[美]R·R·BATE教授等 著

吴鹤鸣 李肇杰 译 杨炳蔚 校

航天动力学基础

北京航空航天大学出版社

30836705

V412
11

航天动力学基础

〔美〕R.R.BATE 教授等　著

吴鹤鸣　李肇杰　译

杨炳蔚　校

北18/07

北京航空航天大学
藏书
图书馆

北京航空航天大学出版社

C0008829

内 容 简 介

本书系美国使用的教科书。它全面、完整地阐述了航天轨道飞行动力学各方面（含弹道导弹弹道计算）的问题，行文清晰，层次明了，概念严谨，本质说明准确。它由基础理论开始，到轨道理论、计算及应用，每章均附练习题。主要内容是：二体轨道力学；用观测数据确定轨道；基本轨道机动；位置、速度、时间的函数关系；由位置和飞行时间确定轨道；弹道导弹、奔月、行星际飞行轨道；扰动理论。

本书既做为高等学校师生的教学参考书及教材，亦可做科研院所科技人员的参考书。

航天动力学基础
FUNDAMENTALS OF ASTRODYNAMICS
〔美〕 R.R.BATE教授等 著
吴鹤鸣 李肇杰 译 杨炳蔚 校
责任编辑 许传安
北京航空航天大学出版社出版
新华书店总店科技发行所发行 各地新华书店经售
北京密云华都印刷厂印装
• • •
850×1168 1/32 印张：13 字数：349千字
1990年11月第一版，1990年11月第一次印刷，印数：1000册
ISBN 7-81012-200-2/TK·010 定价：7.00元

作者序言（摘译）

每一个渴望从事航天科学技术及其应用的工程师和科学家，都必须首先钻研航天动力学。从事卫星或其它空间飞行器专业的人，要对航天动力学有个基本的了解；从事运载火箭和弹道导弹专业的人，则必须具备较为扎实的航天动力学基础。

美国空军学院从1959年的第一届毕业生开始讲授航天动力学课程，对于用什么样的课程结构和什么样的理论途径最适合于此课程的教学，积累了许多经验。此书正是在这一基础上写成的。因此，该书与其说是一本透彻论述航天动力学的专著，还不如说是一本教科书。

本书在讲述航天动力学理论时，简要地介绍了其历史发展的背景。虽然在书中讨论了许多经典的方法，但重点还是放在普适变量的方法上。书中的理论推导是严格的，但又是易懂和实用的。本书引用了较多的例题，以便指导提高学生应用理论的能力。每章结尾都列出了一批习题，包括公式推导、定性分析和定量计算方面的题目。习题的难易程度不一，有的直截了当，有的较为困难（难度较大的习题都打上了 * 号）。除了习题外，附录D还列出了几个课外研究课题。这些课题适用于提高班。

本书的第一章研究了二体问题和多体问题，是书中其余各章的基础。第二章讲述了根据各种不同类型的观测数据来确定运动轨道的方法，还介绍了经典轨道要素、坐标变换、非球形地球和不同的修正方法。第三章研究轨道机动转移，如霍曼转移。第四、第五两章讨论了飞行时间，着重讲述了普适变量解，详细探讨了经典力学的开普勒问题和高斯问题。第六章讨论了二体力学在弹道问题中的应用，包括发射误差分析和在不断旋转的地球上的目标瞄准问题。第七和第八章专门论述了进一步把二体力学应用于绕月飞行和行星际飞行的问题。第九章对扰动分析方法作了

简要介绍，重点讲述了特殊扰动的分析方法。该章还讨论了积分方法及其误差分析，以及几种常用的扰动解析公式。

本书用作大学本科的航天动力学教程时，建议采用以下顺序：第一章，第二章（从2·1节到2·7节，从2·13节到2·15节），第三章，第四章（从4·1节到4·5节），第六章，第七章或第八章，还可以加上附录D中的课外研究课题SITE/TRACK和PREDICT。用作提高班的教程时，可采用如下顺序：第二章（从2·8节到2·12节），复习第四章的开普勒问题，并做附录D中的课外研究课题KEPLER，第五章，包括附录D中的课外研究课题GAUSS和INTERCEPT，第九章。

教授R.R.BATE
副教授D.D.MULER
副教授J.E.WHITE
于科罗拉多州美国空军学院

试读结束：需要全本请在线购买： www.ertongbook.com

目　录

第一章 二体轨道力学

1642年（也就是伽利略逝世的那一年）圣诞节，在柯斯特沃斯河畔的沃尔索普庄园，诞生了一个非常瘦小的男孩。如同孩子的母亲后来告诉他的那样，出生时他小得几乎可以放进一只一夸脱的杯子里，瘦弱得必须用一个软垫围着脖子来支起他的头。这个不幸的孩子在教区记事录上登记的名字是“伊萨克和汉纳·牛顿之子伊萨克”。虽然没有什么贤人哲士盛赞这一天的记录，然而，这个孩子却将要改变全世界的思想和习惯。

——詹姆斯·R·纽曼[1]

1·1 历史背景和基本定律

如果说1642年的圣诞节迎来了理性的时代，那么完全是由于有两个人为大约50年后牛顿最伟大的发现奠定了基础，一个是第谷·布拉赫，另一个是约翰·开普勒。他们一起共事仅18个月，布拉赫就逝世了。

在同一科学领域内工作，而彼此的差异又如此之大，恐怕再也找不出象布拉赫和开普勒那样的例子了。

第谷是一位高贵的丹麦贵族，具有非凡的机械天才，在收集和记录行星精确位置的数据上极为细致，但他缺乏理论推断的天赋和数学方面的能力。

开普勒是个贫穷而多病的数学家，天生就不善于作精密的观察。可是他却极有耐心，同时具有天赋的数学才能，而这些品质正好是揭开隐藏在第谷的观察数据背后的秘密所必须的。

1·1-1 开普勒定律

亚里斯多德认为圆周运动是唯一合乎自然的完美运动，因此，天体必定是作圆周运动。自他以后，天文学家总是假定行星在作圆周运动，或者是大圆周运动和小圆周运动的复合运动。然而，开普勒此时已有第谷的精确观察结果可供参照，他发现这种理论与观察到的事实极难调和。从1601到1606年，他尝试用各种几何曲线来拟合第谷对火星位置的观测数据。为了除去8分（弧度）的偏差，他几乎奋斗了一年（任何一个欠认真的人都可能会认为这一微小偏差可以忽略不计）。最后他找到椭圆是个可能的解。结果很理想，发现了火星的轨道，1609年，开普勒又发表了行星运动的第一和第二定律，而第三定律则是1619年才发表。

在数学史上具有划时代意义的开普勒三大定律如下：

开普勒三大定律

第一定律——各行星的轨道均为椭圆形，太阳位于它的一个焦点上。

第二定律——行星与太阳的连线在相等时间内扫过的面积相等。

第三定律——行星运动周期的平方与行星至太阳平均距离的三次方成正比。

当然，开普勒三大定律只是行星运动的一种描述，还不是解释。揭示其中的奥秘还有待天才的牛顿。

1665年，当牛顿还是剑桥大学的一个学生时，一场流行性瘟疫迫使大学关闭了二年。这二年是牛顿一生中最富于创造性的时期。在1666年漫长的假期里，这位23岁的天才构思着万有引力定律，同时还研究了微积分的基本概念。可是，由于解释月球运动中出现的一些微小的差异，他把论文搁置到了一边，致使大约在20年之后，世人才知道他的重大发现。

牛顿的发现能为世人所知，应归功于哈雷彗星的发现者埃德蒙·哈雷。1685年的一天，哈雷同他的二个朋友克里斯托弗·雷恩

试读结束：需要全本请在线购买： www.ertongbook.com

和罗伯特·胡克正在讨论德斯卡茨的理论。这一理论是利用扫过太阳周围行星的旋涡来解释行星的运动。由于对这一理论的解释不满意，他们推测，一种类似于磁力并随着距离的平方而下降的力，也许不一定要求行星精确地以椭圆轨道运行。胡克认为这很容易证明，并就这件事打赌：若胡克能在两个星期内给出证明，雷恩将给他40先令。两个星期过去了，胡克那儿毫无音讯。几个月后，哈雷在剑桥拜访牛顿，他没有提起那次打赌，而是随便地问牛顿："如果太阳以一个与距离平方成反比的力吸引行星，那么行星应该以什么样的轨道运行呢？"使哈雷感到十分惊讶的是牛顿毫不犹豫地答道："那还用说，当然是椭圆。我已经计算过了，在我的一篇论文中已经作了证明。过几天我找出来给你。"牛顿提到了他20年前所做的研究。就是这样，完全是一种偶然的方式，他的最伟大的发现才为世人所知。

哈雷在惊讶之余，劝他这位沉默寡言的朋友把行星运动彻底地研究一下，然后公开发表出来。牛顿用了两年时间，研究结果发表在1687年出版的《自然哲学的数学原理》或简称《原理》的书中。毫无疑问，这是人类思想最伟大的成就之一。

1·1-2 牛顿运动定律

在《原理》的第一卷里，牛顿介绍了他的三大运动定律。

牛顿三大定律

> 第一定律，任一物体将保持其静止或是匀速直线运动的状态，除非有作用在物体上的力强迫其改变这种状态。
>
> 第二定律，动量变化速率与作用力成正比，且与作用力的方向相同。
>
> 第三定律，对每一个作用，总存在一个大小相等的反作用。

第二定律的数学表达式如下：

$$\sum \boldsymbol{F} = m\ddot{\boldsymbol{r}} \tag{1·1-1}$$

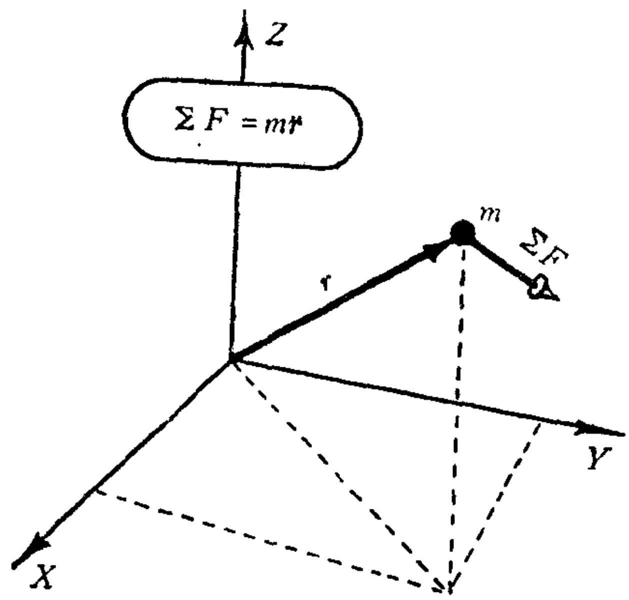

图1·1-1　牛顿运动定律

这里$\Sigma \boldsymbol{F}$为所有作用在质量m上的力的矢量和，$\ddot{\boldsymbol{r}}$为相对于图1·1-1所示的惯性坐标系XYZ测得的该质量的加速度矢量。注意：公式（1·1-1）仅适用于质量不变的系统。

1·1-3　牛顿万有引力定律

在《原理》一书中，牛顿除了发表了他的运动三定律外，他还给出了万有引力定律：任何两个物体间均有一个相互吸引的力，这个力与他们的质量乘积成正比，与两物体间距离的平方成反比。数学上可以用矢量形式把这一定律表示为：

$$\boldsymbol{F}_g = -\frac{GMm}{r^2}\frac{\boldsymbol{r}}{r} \qquad (1\cdot1\text{-}2)$$

其中，$\boldsymbol{F}_g$为由于质量M引起的作用在质量m上的力，$\boldsymbol{r}$为从M到m的矢量。万有引力常数G的值为6.670×10^{-8}达因cm^2/gm^2。

在下节里我们将把式（1·1-2）应用于式（1·1-1），推导出行星和卫星的运动方程。我们先讨论一般的N体问题，然后再专门

研究二体问题。

1·2 N 体 问 题

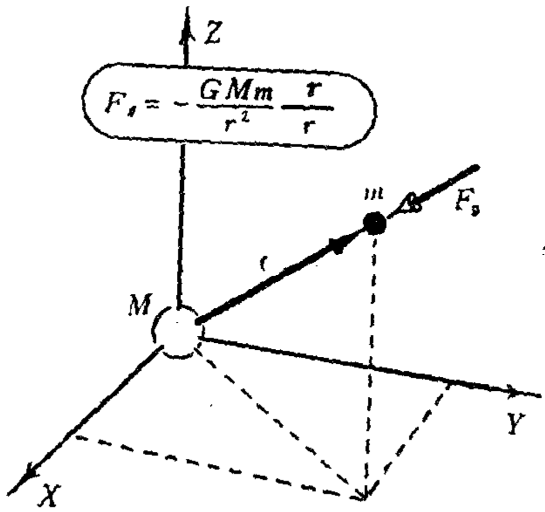

图1·1-2 牛顿引力定律

在这一节里，我们将较详细地讨论物体的运动（例如地球卫星、月球、星际探测器、或是行星）。在它们运动中的任何给定时刻，均受到几个引力的作用，甚至还受到其它的力，例如阻力、推力和太阳辐射压力等的作用。

假定一个由n个物体（m_1，m_2，$m_3\cdots m_n$）构成的系统，其中之一称为第i个物体m_i，我们将研究它的运动。为了建立物体的运动方程，就要列出作用于m_i上的所有引力和其它外力的矢量之和。而各种引力均可以用牛顿万有引力定律来确定。此外，我们还假定第i个物体可以是一个排出质量（例如推进剂）以产生推力的火箭；运动可能在大气层内，因此存在阻力；太阳辐射也会在物体上产生压力；等等。在一般运动方程中，所有这些影响都必须考虑到。尚未提到的另一个重要的力是由于行星的非球形引起的力。地球在两极处较偏平，在赤道处较凸出。月球在两极附近和赤道附近均为椭球状。牛顿万有引力定律仅适用于球状的且质量均匀分布的物体。因此，引力计算中的误差主要是由于物体的形状造成的。对于近地卫星而言，这一误差的数量级大致为$10^{-3}g$，虽然这个误差很小，但它会导致一些用开普勒和牛顿理论无法预测的重要影响。例如，产生交点线的退行和拱点线的转动等效应，这些效应将在第三章讨论。

分析的第一步应选择一个适于描述物体运动的坐标系。这件

事做起来并不容易，因为所选的任何坐标系其惯性特征都存在某种程度的不确定性。为不失一般性，假定存在某个合适的坐标系，在该坐标系内，n个质量的位置分别为$\boldsymbol{r}_1$，$\boldsymbol{r}_2$，…$\boldsymbol{r}_n$，此系统如图1·2-1所示。

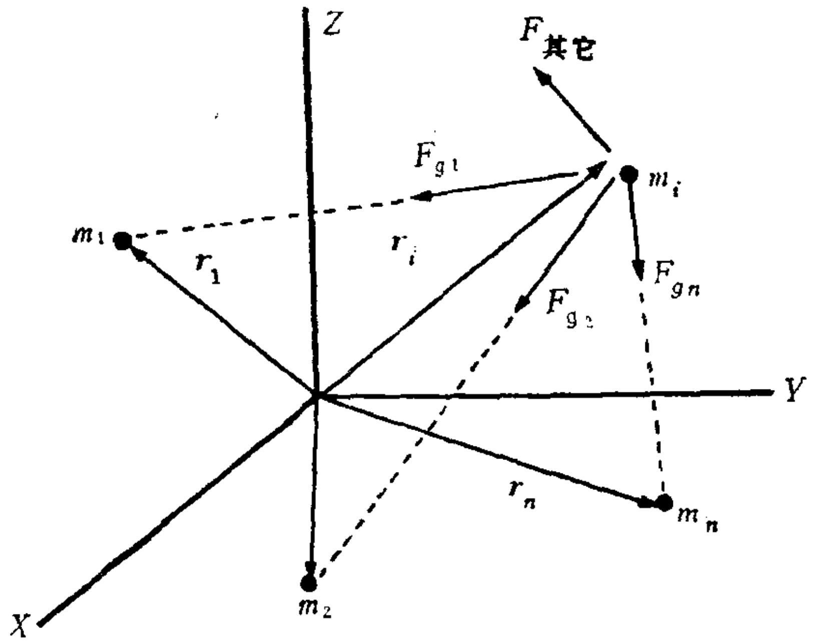

图1·2-1　N体问题

由牛顿万有引力定律得出，m_n作用在m_i上的力$\boldsymbol{F}_{gn}$为

$$\boldsymbol{F}_{gn} = -\frac{G m_i m_n}{r_{ni}^3}(\boldsymbol{r}_{ni}) \tag{1·2-1}$$

其中

$$\boldsymbol{r}_{ni} = \boldsymbol{r}_i - \boldsymbol{r}_n \tag{1·2-2}$$

作用在第i个物体上的所有引力的矢量和$\boldsymbol{F}_g$为

$$\boldsymbol{F}_g = -\frac{G m_i m_1}{r_{1i}^3}(\boldsymbol{r}_{1i}) - \frac{G m_i m_2}{r_{2i}^3}(\boldsymbol{r}_{2i}) - \cdots - \frac{G m_i m_n}{r_{ni}^3}(\boldsymbol{r}_{ni}) \tag{1·2-3}$$

显然，式（1·2-3）中不包含

$$-\frac{G m_i m_i}{r_{ii}^3}(\boldsymbol{r}_{ii}) \tag{1·2-4}$$

这是因为物体不能对自己作用一个力。用求和符号简化 式(1•2-3)得到

$$\boxed{\boldsymbol{F}_g = -Gm_i\sum_{\substack{j=1\\j\neq i}}^{n}\frac{m_j}{r_{ji}^3}(\boldsymbol{r}_{ji})} \tag{1•2-5}$$

图1•2-1中所示的其它外力$\boldsymbol{F}_{其它}$，包括阻力、推力、太阳辐射压力、由于非球形造成的摄动力等。作用在第i个物体上的合力称为$\boldsymbol{F}_{总}$:

$$\boldsymbol{F}_{总} = \boldsymbol{F}_g + \boldsymbol{F}_{其它} \tag{1•2-6}$$

现在应用牛顿第二运动定律

$$\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}(m_i v_i) = \boldsymbol{F}_{总} \tag{1•2-7}$$

把对时间的导数展开，得到

$$m_i\frac{\mathrm{d}v_i}{\mathrm{d}t} + v_i\frac{\mathrm{d}m_i}{\mathrm{d}t} = \boldsymbol{F}_{总} \tag{1•2-8}$$

如前所述，物体可能不断排出某些质量以产生推力，在这种情况下，式（1•2-8）中的第二项就不等于零。某些与相对论有关的效应也会导致质量m_i随时间变化。换句话说，$F = ma$ 并非总是成立的，特别是在空间动力学中。式（1•2-8）各项除以m_i，就得出第i个物体的一般运动方程

$$\boxed{\ddot{\boldsymbol{r}}_i = \frac{\boldsymbol{F}_{总}}{m_i} - \dot{\boldsymbol{r}}_i\frac{\dot{m}_i}{m_i}} \tag{1•2-9}$$

这里，$\ddot{\boldsymbol{r}}_i$为第i个物体相对于X, Y, Z坐标系的矢量加速度，m_i为第i个物体的质量。

$\boldsymbol{F}_{总}$为所有引力

$$\boldsymbol{F}_g = -Gm_i\sum_{\substack{j=1\\j\neq i}}^{n}\frac{m_{j1}}{r_{ji}^3}(\boldsymbol{r}_{ji})$$

及所有其它外力

$$\boldsymbol{F}_{\text{其它}}=\boldsymbol{F}_{\text{阻力}}+\boldsymbol{F}_{\text{推力}}+\boldsymbol{F}_{\text{太阳压力}}+\boldsymbol{F}_{\text{干扰}}+\text{等等}$$

的矢量之和。

$\dot{\boldsymbol{r}}_i$为第i个物体相对于坐标系X,Y,Z的速度矢量。

$\dot{m}_i$为第i个物体的质量随时间的变化率（由于排出物质或与相对论有关的效应引起的)。

方程（1•2-9）是一个二阶非线性矢量微分方程,这种形式的微分方程是很难求解的，因此需要作些简化的假定，这当然会与真实情况有所偏离。

假定第i个物体的质量保持不变(即无动力飞行,$\dot{m}_i=0$),同时还假定阻力和其它外力也不存在，这样，唯一存在的力为引力，于是方程（1•2-9）简化成

$$\ddot{\boldsymbol{r}}_i=-G\sum_{\substack{j=1\\j\neq i}}^{n}\frac{m_j}{r_{ji}^3}(\overline{\boldsymbol{r}_{ji}}) \qquad (1\text{•}2\text{-}10)$$

假定m_2为一颗地球卫星，m_1为地球，而余下的$m_3,m_4\cdots m_n$可以是月球、太阳和其它行星。于是对$i=1$的情况,写出方程(1•2-10)的具体形式，得到

$$\ddot{\boldsymbol{r}}_1=-G\sum_{j=2}^{n}\frac{m_j}{r_{j1}^3}(\boldsymbol{r}_{j1}) \qquad (1\text{•}2\text{-}11)$$

对$i=2$的情况，方程（1•2-10）变成

$$\ddot{\boldsymbol{r}}_2=-G\sum_{\substack{j=1\\j\neq 2}}^{n}\frac{m_j}{r_{j2}^3}(\boldsymbol{r}_{j2}) \qquad (1\text{•}2\text{-}12)$$

根据式（1•2-2），有

$$\boldsymbol{r}_{12}=\boldsymbol{r}_2-\boldsymbol{r}_1 \qquad (1\text{•}2\text{-}13)$$

于是有

$$\ddot{\boldsymbol{r}}_{12}=\ddot{\boldsymbol{r}}_2-\ddot{\boldsymbol{r}}_1 \qquad (1\text{•}2\text{-}14)$$

将式（1•2-11）和（1•2-12）代入式（1•2-14）得到

试读结束：需要全本请在线购买： www.ertongbook.com